

METODE PERHITUNGAN MASSA GAS CO₂ YANG DISERAP FOTOBIOREAKTOR DENGAN PERSAMAAN GAS IDEAL

Arif Dwi Santoso dan Kardono

Peneliti di Pusat Teknologi Lingkungan
Badan Pengkajian & Penerapan Teknologi

Abstract

BPPT conducted the mass of CO₂ gas calculation in the gas absorption experiments with phytoplankton cultivation in the photobioreaktor (FBR) batch and continuous system using the ideal gas equation. This study stated that the method of calculation with the ideal gas equation is more simple and practical in providing data analysis compared with biomass methods. Some things to note in this method include good knowledge about the movement of the gas flow diagram of inputs and outputs FBR, an appropriate gas sampling, and accuracy of measuring instruments. The required data in the mass calculation of CO₂ gas in a batch photobioreaktor system was resultant CO₂ concentration during measurement. Meanwhile in a continuous systems, the required data was CO₂ concentration at the reactor input and output, the rate and duration of the injection gas.

Keywords : massa gas CO₂, dry weight, ideal gas formula

I. PENDAHULUAN

Meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca khususnya karbon dioksida (CO₂) di atmosfer yang didominasi akibat dari aktivitas manusia menyebabkan berbagai dampak negatif bagi lingkungan dan kehidupan yang ada di dalamnya. Berbagai upaya mitigasi terhadap peningkatan CO₂ di atmosfer bumi telah dilakukan yang salah satunya adalah pemanfaatan fitoplankton yang dikultur dalam fotobioreaktor (FBR) sebagai penyerap gas CO₂ secara alami¹⁾.

Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) pada tahun 2008 telah melakukan uji coba kultur fitoplankton air tawar dan air laut dalam sebuah FBR *airlift* sistem *batch*. Pada uji coba tersebut telah dihasilkan penurunan gas CO₂ secara meyakinkan, yakni konsentrasi CO₂ sekitar 12% pada awal percobaan dapat diturunkan menjadi mendekati 0% dalam waktu sekitar

7 hari oleh species *Chlorella sp.*, dan sekitar 13 hari oleh species *Chaetoceros sp.*²⁾.

Pada tahun 2009, uji coba penyerapan gas CO₂ dengan kultur fitoplankton dalam FBR diubah dengan sistem kontinyu. Pada uji coba lanjutan ini mempertegas hasil sebelumnya tentang kemampuan fitoplankton dalam menyerap gas CO₂. Dari tiga kali eksperimen sistem kontinyu ini dihasilkan data kapabilitas penyerapan oleh sistem FBR terhadap gas sebesar 0,8 – 1,01 gr CO₂/liter media/hari. Konsentrasi awal gas CO₂ dalam percobaan ini adalah sekitar 9%, laju alir gas 1 l/menit, dalam volume FBR sebesar 70 liter.

Eksperimen tersebut dilaksanakan dengan beberapa tahapan, antara lain meliputi kegiatan perakitan FBR, perancangan uji coba, pengambilan dan analisis sampel, serta perhitungan hasil analisa. Salah satu

tahapan yang dikupas dalam paper ini adalah metode perhitungan gas yang terserap dalam FBR dengan menggunakan persamaan gas ideal. Bahasan tahapan tentang perhitungan gas yang terserap ini menarik dilaporkan di sini karena metode ini lebih sederhana dan praktis dalam menghasilkan data dibanding dengan metode analisa biomassa yang memerlukan waktu dan biaya yang besar.

2. PERHITUNGAN MASSA GAS CO₂

Prinsip perhitungan massa gas CO₂ dapat dilakukan dengan berdasarkan pada berat kering biomassa dan perhitungan persamaan gas ideal. Prinsip perhitungan berdasarkan berat kering biomassa adalah dengan mengasumsikan bahwa setiap gas CO₂ yang digunakan untuk proses fotosintesis akan menghasilkan biomassa fitoplankton. Jadi berat kering biomassa fitoplankton³⁾ tersebut dianggap sama dengan berat gas CO₂ yang terserap selama pertumbuhan fitoplankton tersebut.

Cara kedua adalah dengan cara menghitung massa molekul CO₂ yang diinjeksikan dalam FBR. Menurut hukum persamaan gas ideal yang diturunkan dari hukum Boyle, hukum Charles dan hukum Gay-Lussac menyatakan bahwa massa suatu zat setara dengan massa molekul zat tersebut yang dinyatakan dalam 1 (satu) mol⁴⁾ Dengan asumsi hukum-hukum di atas, maka massa gas CO₂ dapat dihitung dari jumlah mol dan volume gas CO₂ yang masuk dalam FBR.

Rincian penurunan rumus perhitungan gas CO₂ adalah sebagai berikut :

Hukum Boyle : menyatakan bahwa apabila suhu gas konstan, maka ketika tekanan gas bertambah, volume gas semakin berkurang. Dengan demikian volume gas berbanding terbalik dengan tekanannya.

$V \sim 1/P \rightarrow T \text{ konstan} \dots\dots$ Hubungan 1

dimana :

~ : sebanding
V : volume (meter kubik = m³)
P : tekanan (Newton per meter kuadrat (N/m²) = Pascal (pa))
T : suhu (Kelvin = K)

Hukum Charles : menyatakan hubungan antara suhu dan volume gas. Apabila tekanan gas konstan, maka ketika suhu mutlak gas bertambah, volume gas akan bertambah, sebaliknya ketika suhu mutlak gas berkurang, volume gas juga ikut berkurang. Secara matematis ditulis sebagai berikut :

$V \sim T \rightarrow P \text{ konstan} \dots\dots$ Hubungan 2

Hukum Gay-Lussac menyatakan bahwa pada volume gas konstan, tekanan gas bertambah, maka suhu mutlak gas akan bertambah, demikian juga sebaliknya. Jadi volume konstan, tekanan gas berbanding lurus dengan suhu mutlaknya.

$P \sim T \rightarrow V \text{ konstan} \dots\dots$ Hubungan 3

Hukum Boyle, hukum Charles dan hukum Gay-Lussac diatas menghasilkan hubungan antara suhu, volume dan tekanan gas secara terpisah. Ketiga hukum tersebut memiliki keterkaitan erat dan saling mempengaruhi, sehingga bila diturunkan akan menghasilkan hukum persamaan gas ideal.

Jika hubungan 1, hubungan 2 dan hubungan 3 digabung menjadi satu, maka akan dihasilkan seperti ini :

$P V \sim T \rightarrow \dots\dots\dots$ Hubungan 4

Hubungan ini menyatakan bahwa perkalian antara tekanan (P) dan volume (V) gas dalam suatu tempat akan sebanding dengan suhu mutlak (T)nya.

Hubungan 4 dapat ditulis menjadi 2 persamaan :

$$\frac{PV}{T} = \text{Konstan}$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Keterangan :

P_1 = tekanan kondisi 1

P_2 = tekanan kondisi 2

V_1 = volume kondisi 1

V_2 = volume kondisi 2

T_1 = suhu mutlak kondisi 1

T_2 = suhu mutlak kondisi 2

Setelah mengetahui hubungan antara suhu, volume dan tekanan gas, maka massa gas akan dengan mudah dapat dihitung, karena setiap zat atau materi, termasuk zat gas terdiri dari atom-atom atau molekul-molekul mempunyai massa.

Massa gas (m) berbanding lurus dengan volume gas (V). Secara matematis ditulis seperti ini :

$V \sim m \rightarrow \dots\dots\dots$ Hubungan 5

Jika perbandingan 4 digabung dengan perbandingan 5 maka akan menjadi seperti ini :

$PV \sim mT \rightarrow \dots\dots\dots$ Hubungan 6

Pada perbandingan 6 di atas, apabila kita menggunakan jumlah mol (n) untuk menyatakan ukuran suatu zat maka diperlukan konstanta perbandingan yang besarnya sama untuk setiap gas. Konstanta perbandingan yang dimaksud adalah konstanta gas universal (R) yang nilainya adalah 8,315 (J/mol.K) atau 0,0821 (L.atm / mol.K)⁵⁾

(J = Joule, K = Kelvin, L = liter, atm = atmosfer, kal = kalori)

Sehingga persamaan gas ideal menjadi **$PV = nRT$**

dimana :

P = tekanan gas

V = volume gas

n = jumlah mol

R = konstanta gas universal

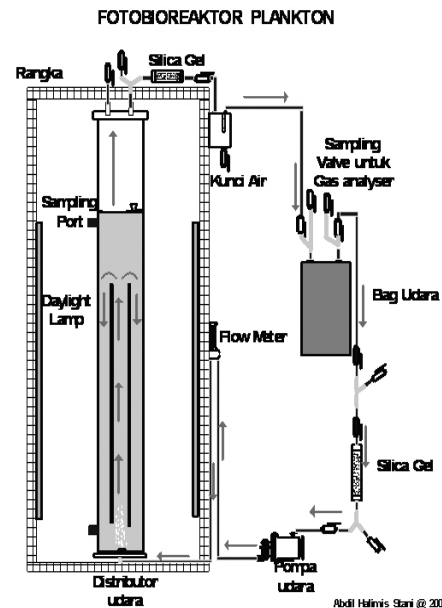
T = suhu mutlak gas

Persamaan ini dikenal dengan julukan hukum gas ideal atau persamaan keadaan gas ideal.

3. APLIKASI PERHITUNGAN

3.1. Contoh Perhitungan Massa Gas CO₂ dalam Fotobioreaktor Sistem *Batch*

Proses penginjeksian gas CO₂ dalam fotobioreaktor sistem *batch* disajikan dalam gambar di bawah ini.



Gambar 1. Skema distribusi gas udara dalam fotobioreaktor system *batch*

Dalam proses pengoperasian, FBR dijalankan dalam waktu 1 siklus hidup fitoplankton (10–14 hari). Volume media dalam reaktor disesuaikan dengan kebutuhan sampling media reaktor dalam waktu 14 hari. Volume reaktor didesain dengan volume 50 liter, yang berisi media 40 liter dan ruang untuk udara 10 liter. Perkiraan kebutuhan

sampling selama 14 hari adalah sebesar 4 liter. Aliran CO₂ diresirkulasikan dalam sistem tertutup melalui *gas holder* untuk kemudian diinjeksikan kembali ke dasar reaktor dan disirkulasikan kembali ke *gas holder*. Konsentrasi CO₂ dalam *gas holder* diukur secara kontinyu selama 14 hari dengan menggunakan CO₂ gas analyzer.

Perhitungan massa CO₂ yang diserap oleh FBR sistem *batch* dapat diketahui dengan memperhitungkan selisih antara massa CO₂ pada pengukuran pada hari yang ditentukan dengan massa gas CO₂ pada hari sebelumnya.

Secara ringkas perhitungan adalah sebagai berikut :

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$P \cdot V = (m/Mr) R \cdot T \quad m/V = P \cdot Mr / R \cdot T \quad \rho = P \cdot Mr / R \cdot T$$

dimana :

P = tekanan gas

V = volume gas

n = jumlah mol

R = konstanta gas universal

T = suhu mutlak gas

ρ = massa jenis gas

Mr = Bilangan atom gas

Studi Kasus 1 :

Udara dipompakan pada reaktor sistem *batch* A dan B adalah 16 liter dan 17 liter, dengan kadar CO₂ 7,3% dan 9,4 %.

Maka total massa gas CO₂ yang diinjeksikan ke dalam reaktor selama eksperimen adalah :

$$\begin{aligned} \rho \text{ CO}_2 &= P \cdot Mr / R \cdot T \\ &= (0,78 \text{ atm} \cdot 44 \text{ g/g mole}) / (0,0821 \\ &\quad \text{atm.L/g.mole.K}) \cdot (300,95 \text{ K}) \\ &= 1,389 \text{ g/L} \end{aligned}$$

Massa gas CO₂ yang diserap menjadi:

$$m = V \cdot \rho$$

$$\begin{aligned} &= (17 \text{ liter} \cdot 9,4 \%) \cdot 1,289 \text{ g/L} \\ &= 2,22 \text{ g} \end{aligned}$$

Maka Total Massa CO₂ yang diinjeksikan selama eksperimen adalah **2.22 gram**. Dengan perhitungan yang sama seperti di atas maka total massa CO₂ yang diinjeksi ke reaktor A dan B adalah sbb:

Tabel 1. Hasil perhitungan massa CO₂ input dan output (gr) dan massa CO₂ terserap (gr)

Reaktor	Vol Gas Holder (liter)	Kadar CO ₂ (%)	Massa CO ₂ (gr)
A	16	7.3	1.624
B	17	9.4	2.222

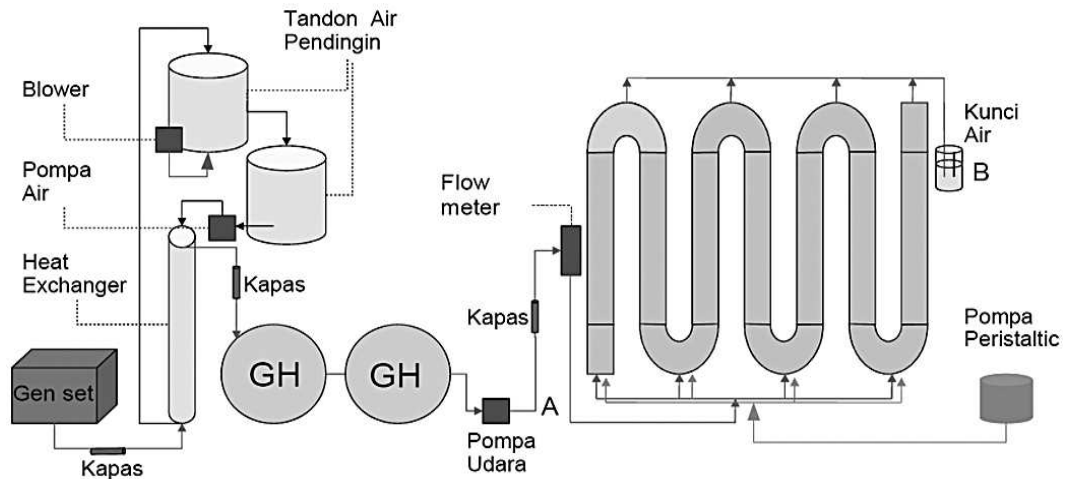
3.2. Perhitungan Massa Gas CO₂ dalam Fotobioreaktor Sistem Kontinyu

Diagram alir proses penginjeksian gas CO₂ dalam fotobioreaktor sistem kontinyu disajikan dalam gambar 2.

Pertama-tama gas CO₂ diambil dari selang/pipa yang keluar dari pompa udara (A), sementara output gas sampel diambil pada sub sistem kunci air (B). Laju penginjeksian gas dapat diketahui dari flow meter yang dipasang pada rangkaian sebelum gas masuk ke reaktor. Data input gas yang diperhitungkan dalam perhitungan kali ini adalah *flow rate* gas dan konsentrasi gas yang masuk dalam reaktor serta lamanya waktu injeksi, sementara data output yang diperlukan hanya konsentrasi gas yang keluar dari sistem.

Studi Kasus 2 :

Dalam percobaan yang dilakukan untuk FBR kontinyu diperoleh waktu operasi 9 hari. Data yang diukur meliputi laju alir sebesar 0,5 liter/menit, konsentrasi CO₂ rata-rata pada saat masuk FBR sebesar 8,5%, bekerja pada suhu ambien 26 °C dan tekanan udara 0,78 bar. Dari pengukuran



Gambar 2. Pola penginjeksian gas dalam fotobioreaktor sistem kontinu

keluaran FBR-1 dan FBR-2 berturut-turut diperoleh nilai konsentrasi CO_2 sebesar 4,9% dan 4,72%.

Dengan metode perhitungan massa molekul CO_2 , hasil percobaan ini dapat dihitung komponennya sbb:

Volume udara yang dipompakan (sehari) sebesar 0,5 L/menit x 24 jam x 60 (menit/jam); dengan demikian total volume udara sebesar 720 Liter. Volume udara yg dipompakan selama 9 hari adalah 720 Liter x 9 adalah 6.480 Liter

Dari data ini dapat diperhitungkan volume CO_2 sebesar 8.5% x 6.480 Liter, yakni sebesar 550,8 Liter.

Dari rumus paparan di atas dapat dihitung sbb :

$$\begin{aligned} \rho_{\text{CO}_2} &= P.Mr / R.T \\ &= (0,78 \text{ atm} \cdot 44 \text{ g/g mole}) / \\ &\quad (0,0821 \text{ atm.L/g.mole.K}). \\ &\quad (299,15 \text{ K}) \\ &= 1,397 \text{ g/L} \end{aligned}$$

Massa gas CO_2 yang diinjeksikan dalam FBR adalah :

$$\begin{aligned} m &= V \cdot \rho \\ &= (550,8 \text{ liter}) \cdot 1,397 \text{ g/L} \\ &= 769,7 \text{ g} \end{aligned}$$

Maka Total Massa CO_2 yang diinjeksikan ke reaktor 1 dan 2 adalah 769,7 gram.

Setelah itu, perhitungan dilanjutkan untuk mengetahui total massa CO_2 yang keluar dari sistem reaktor.

Data yang dipergunakan dalam perhitungan ini meliputi :

Konsentrasi rata-rata gas yang keluar dari reaktor 1 = 4,9%

Konsentrasi rata-rata gas yang keluar dari reaktor 2 = 4,72%

Sehingga konsentrasi rata-rata menjadi 4,81 %

Perhitungan massa gas CO_2 yang terserap oleh FBR dapat dilakukan dengan 2 cara :

- Dengan membandingkan massa gas CO_2 yang injeksikan dengan massa gas yang dikeluarkan dari FBR

Massa gas CO₂ yang keluar dari FBR

$$\begin{aligned} m &= V \cdot \rho \\ &= (550,8 \text{ liter} \cdot 4,81\%) \cdot 1,397 \text{ g/L} \\ &= 435,42 \text{ g} \end{aligned}$$

Sehingga, massa gas yang terserap oleh FBR adalah Massa gas CO₂ yang diinjeksikan dalam FBR dikurangi Massa gas CO₂ yang keluar dari FBR.

$$\begin{aligned} &= 769,7 \text{ g} - 435,42 \text{ g} \\ &= 435,42 \text{ g} \end{aligned}$$

Dengan mengalikan massa massa gas CO₂ yang injeksikan ke FBR dengan prosentase konsentrasi gas CO₂ yang terserap dalam FBR

Total persen konsentrasi CO₂ yang terserap oleh FBR

$$= (8,5 - 4,81) / 8,5 = 43,41 \%$$

Sehingga massa CO₂ yang tertangkap oleh FBR

$$\begin{aligned} &= 43,4 \% \cdot 769,7 \text{ g} \\ &= 334,14 \text{ g} \end{aligned}$$

4. PEMBAHASAN

Prinsip perhitungan massa gas CO₂ yang terserap dalam suatu FBR dengan menggunakan hukum persamaan gas ideal berpijak pada ketentuan bahwa setiap zat atau materi, termasuk zat gas terdiri dari atom-atom atau molekul-molekul mempunyai massa. Dalam hal pemenuhan kebutuhan data yang mendesak dan tidak memerlukan data berat biomassa secara langsung, metode perhitungan massa gas di atas lebih efisien dan praktis bila dibandingkan dengan metode perhitungan dengan berat kering. Pada perhitungan berat kering, selain memerlukan keahlian khusus

dalam melakukannya juga memakan waktu dan biaya yang relatif besar.

Akan tetapi pada beberapa kasus seperti untuk memenuhi kebutuhan data tentang berat basah dan kering dalam analisa proximate, maka metode perhitungan massa gas CO₂ dengan berat kering mutak dilakukan.

Beberapa hal yang harus diperhatikan dalam metode perhitungan massa gas CO₂ dengan persamaan gas ideal antara lain pengetahuan yang baik tentang diagram alir pergerakan gas dari input hingga output, pengambilan sampel gas yang tepat, serta keakuratan alat ukur yang digunakan. Data yang diperlukan dalam perhitungan massa gas CO₂ dalam fotobioreaktor sistem *batch* meliputi data selisih konsentrasi gas CO₂ selama pengukuran, sementara data yang diperlukan pada sistem kontinyu selain konsentrasi gas CO₂ pada input dan output reaktor juga data laju injeksi dan lamanya injeksi berlangsung.

Kesimpulan

Penentuan massa gas CO₂ yang terserap oleh fotobioreaktor dapat dilakukan dengan mudah dan praktis dengan perhitungan menggunakan rumus gas ideal.

Data yang diperlukan dalam perhitungan massa gas CO₂ dalam fotobioreaktor sistem *batch* meliputi data selisih konsentrasi gas CO₂ selama pengukuran, sementara data yang diperlukan pada sistem kontinyu selain konsentrasi gas CO₂ pada input dan output reaktor juga data laju injeksi dan lamanya injeksi berlangsung.

Faktor penting yang mempengaruhi perhitungan dengan metode ini adalah data konsentrasi gas CO₂ yang diinjeksikan, laju penginjeksian dan lamanya waktu penginjeksian.

DAFTAR PUSTAKA

1. Molina Grima E., F.G. Acien Fernadez, Garcia Comacho, C. Rubio dan Y. Chisti, 2000 Scale-Up of tubulan photobioreaktors
2. Santoso, A.D., Rahmania A. Darmawan, dan Agus Setiawan, 2009. Studi Kemampuan *Chaetoceros sp.* dalam Penurunan Gas CO₂ dalam Fotobioreaktor Sistem Batch. Jurnal Hidrosfir Indonesia (2009) Vol. 3 No. 2
3. Reddy, M.H., 2002. Application of algal culture technology for carbon dioxide and flue gas emission control. Master thesis. Arizona State University. 96 page
4. Tipler, P.A., 1998, Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid I (terjemahan), Jakarta : Penerbit Erlangga
5. Young, Hugh D. & Freedman, Roger A., 2002, Fisika Universitas (terjemahan), Jakarta : Penerbit Erlangga.